

# Extrapolieren: Zwang und Risiko für Bauingenieure

Scheer, Joachim

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 45, 1994,  
S.45-68



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

# Extrapolieren: Zwang und Risiko für Bauingenieure

Von **Joachim Scheer\***, Braunschweig

(Eingegangen am 30. 11. 1994)

## 1 Einleitung

Viele Menschen möchten wissen, wie das Wetter in den nächsten Tagen wird, einige sind an der Entwicklung der Börsenkurse interessiert, und andere fragen schon früh nach der zukünftigen Qualität eines noch jungen Weines.

Diejenigen, die diese Neugier befriedigen sollen, müssen den Schluß auf Sachverhalte, die sie nicht kennen, aus ihren Erfahrungen ziehen: sie müssen extrapolieren. Anders ausgedrückt: sie müssen aus Beziehungen für Bereiche, für die diese bekannt sind, auf Beziehungen in anderen Bereichen schließen: die Meteorologen, wenn auch nicht mehr mit alten Bauernregeln oder dem Hundertjährigen Kalender, so doch aus dem Verlauf vergleichbarer, aber nicht gleicher Wettersituationen und mit Hilfe aufwendiger Berechnungen nach hochkomplizierten Modellen auf das kommende Wetter, die Börsianer aus vergangenen ähnlichen, aber nicht gleichen Wirtschaftssituationen und Anlegerstimungen auf die kommende Entwicklung und die Winzer aus vielen ähnlichen, aber nicht gleichen Eigenheiten früherer Jahrgänge auf die Qualität des neuen Weines.

Alle, die antworten, müssen unterstellen, daß Gesetzmäßigkeiten, die für ein Parameterfeld hergeleitet und bewiesen sind, auch außerhalb dieses Feldes den Sachverhalt richtig und vollständig beschreiben. Es geht – wenn wir das Problem naturwissenschaftlich formulieren – um die

„Fortsetzung im allgemeinen mathematischer oder statistischer Beziehungen, z. B. von Funktionskurven, über den Bereich hinaus, in dem sie definiert wurden, zur näherungsweisen Bestimmung unbekannter Werte“.

So etwa ist Extrapolieren im Brockhaus beschrieben.

Zwangsläufig treffen die, die extrapolieren, mit ihren Angaben manchmal den Sachverhalt gut, manchmal aber auch nicht. Und es liegt in der Natur der Sache, daß sie und wir das erst im Nachhinein wissen.

Was hat das mit Bauingenieuren zu tun?

Zunächst vorab: ein wesentlicher Parameter der zuvor genannten Beispiele ist die Zeit, es geht bei ihnen um Extrapolieren in die Zukunft, also um eine spezielle Teilmenge von Extrapolationen, um Prognosen. Mit ihnen wollen wir uns hier nicht beschäftigen, obwohl Bauingenieure sich auch mit dem Verhalten von Bauwerken unter veränderten Einwirkungen z. B. infolge Klimaveränderungen auseinandersetzen müssen.

---

\* Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. J. Scheer, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, Postfach 3329, 38023 Braunschweig

Ihre Probleme scheinen einfacher zu sein, da weder das Verhalten von Gruppen noch Zufälligkeiten wie z. B. beim Wetter unsere Beziehungen beeinflussen. Sie unterliegen denjenigen Gesetzen der Physik, die so von der Zeit unabhängig sind, so daß wir sagen können: Was gestern galt, gilt auch morgen!

Die entscheidenden Parameter für Bauingenieure sind offensichtlich geometrischer Art, es sind Abmessungen oder deren Verhältnisse. Denn die Entwicklung des Bauingenieurwesens war und ist u. a. gekennzeichnet durch immer größere und immer schlankere Bauwerke, z. B.

- immer weiter gespannte Hallen (Abb. 1) [1],
- immer höhere Türme und Maste (Abb. 2),
- immer weiter frei gespannte Traggerüste (Abb. 3) und
- immer schlankere Konstruktionen (Abb. 4).

Schwieriger einzuordnen in eine „Fortsetzung von Beziehungen über den Bereich hinaus, in dem sie definiert wurden“, sind neuartige Bauweisen, z. B.

- Raumtragwerke mit Stahlkugeln in den Knotenpunkten (Abb. 5) [2]
- Membrankonstruktionen mit neuen Baustoffen (Abb. 6) [3]

und neue Aufgaben, wie z. B. das gewaltige, im Bau befindliche Sperrwerk in Rotterdam (Abb. 7), mit dem bei Sturmflut in kurzer Zeit der neue Schifffahrtsweg mit rd. 400 m Breite durch ein 22 m hohes Tor gegen Sturmfluten geschlossen wird. Seine Tore haben bei einem Radius der Stauwand von 250 m mit „Speichen“ und Lagerkörper die Größe des Eiffelturmes.



Abb. 1:  
*Europahalle der Deutsche Messe AG in Hannover mit 126 m Spannweite*

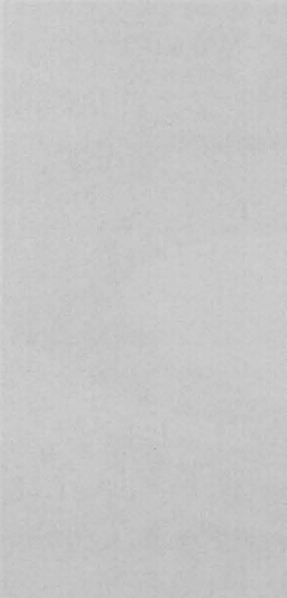


Abb. 2:  
332-m-Mast der Telekom in  
Hühbeck bei Gartow

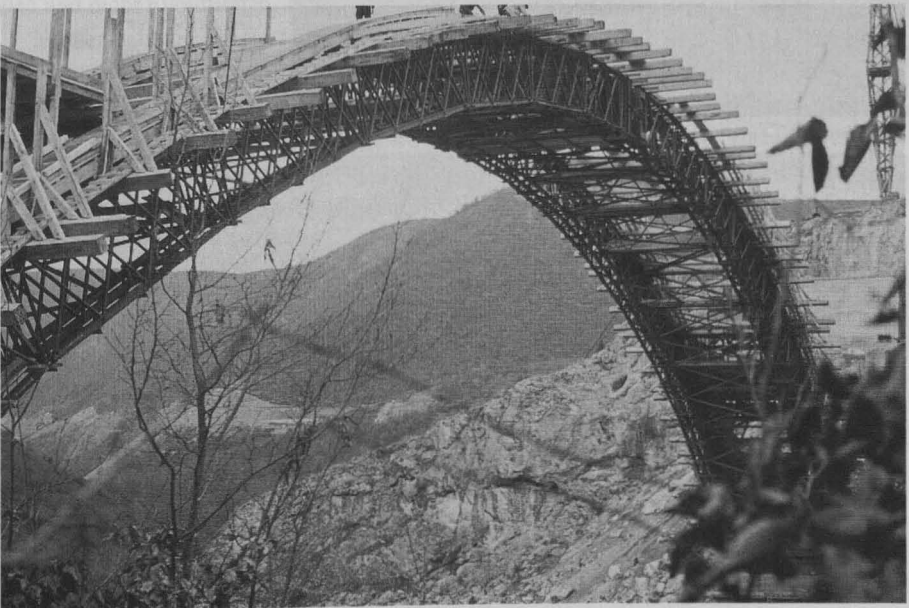
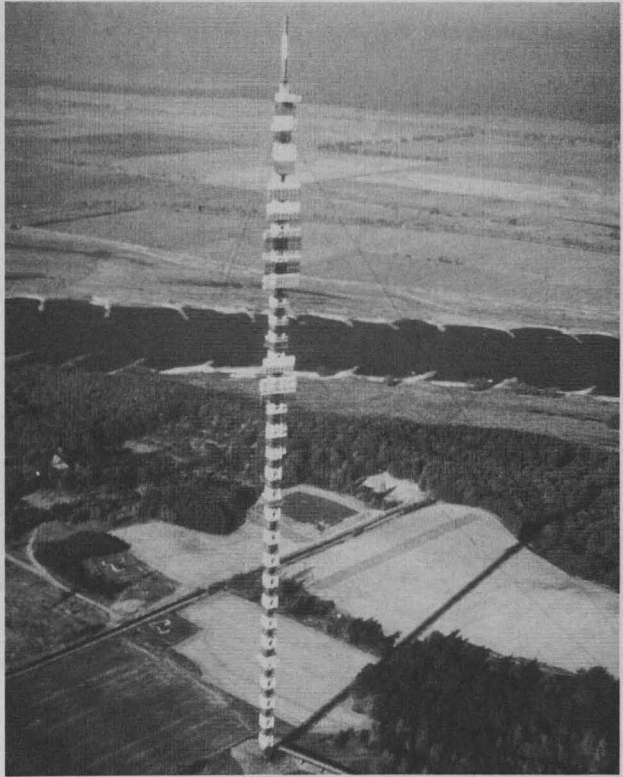


Abb. 3: Lehrgerüst für eine Bogenbrücke in Montenegro mit 86 m Spannweite



Abb. 4:  
Gelenk-Steiger  
(Hubbühne) mit  
4-Mann-Korb,  
64 m maximale Arbeitshöhe

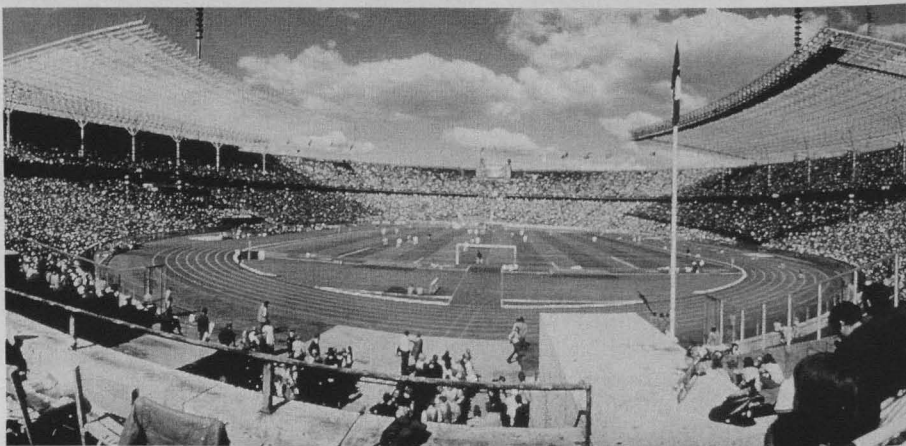


Abb. 5: Raumtragwerke für Tribünenüberdachung im Olympia-Stadion in Berlin,  
Auskragung 37,5 m aus Feld mit 18 m Stützweite

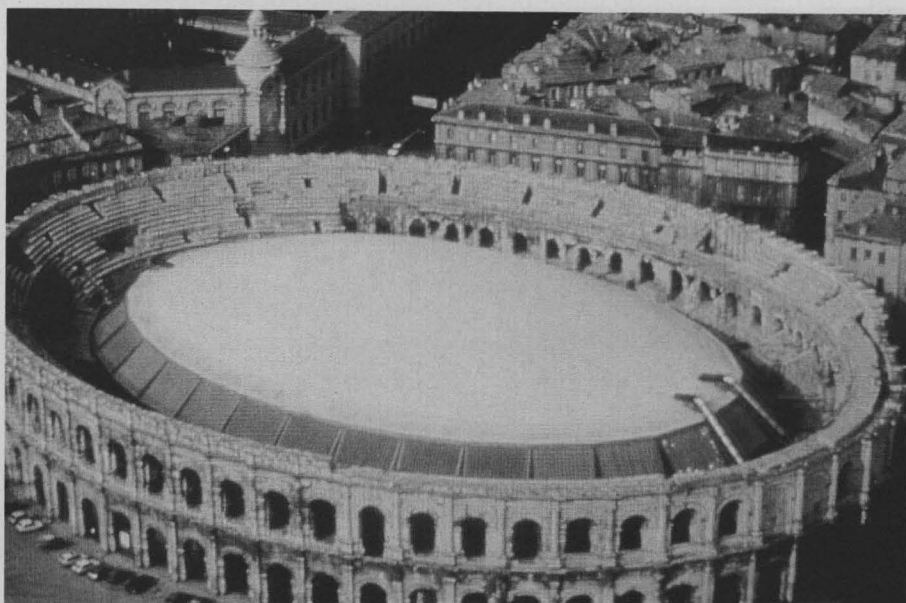


Abb. 6:

*Temporäres Membrankissen-Dach über der Arena in Nîmes mit elliptischem Grundriß,  
Achismaße 88 und 57 m*

Bei dieser Gruppe von Bauwerken bestimmen Sprünge und nicht Kurven, Revolutionen und nicht Evolutionen, die Entwicklung.

Woher nahmen unsere Vorgänger, woher nehmen wir die Courage und die Sicherheit, etwas zu verantworten, was es bisher nicht gegeben hat? Worauf gründet sich das, was manche – m. E. zu Unrecht – Kühnheit nennen?

Was erlaubte z. B. Fillippo Brunelleschi vor rd. 550 Jahren, ohne Vorbild die großartige zweischalige Kuppel des Domes zu Florenz (Abb. 8) mit 42 m Durchmesser, dies noch dazu ohne Lehrgerüst, zu bauen [4]?

Was erlaubt den japanischen Brückenbauern den Sprung der Spannweiten von bisher maximal 1410 m bei der 1981 fertiggestellten Humberbrücke in England auf das fast  $1\frac{1}{2}$ fache, also auf knapp 2 km, wie sie es jetzt mit der im Bau befindlichen Brücke zwischen den Inseln Honshu und Shikoku in einem Gebiet mit starken Erdbeben und Taifunen realisieren?

Und was erlaubt italienischen Brückenbauern, den Vorentwurf für eine Hängebrücke über die Straße von Messina mit der gewaltigen Spannweite von 3300 m vorzulegen (Abb. 9) [5]? Sie wagen einen neuen Sprung auf mehr als das  $1\frac{1}{2}$ fache der bisherigen Rekordspannweite in Japan und stoßen damit an die Grenzen des – zumindest mit den uns z. Zt. zur Verfügung stehenden Werkstoffen – Machbaren vor [6].



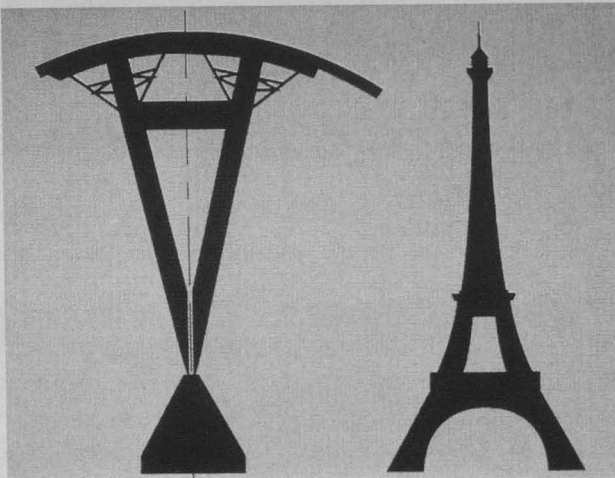
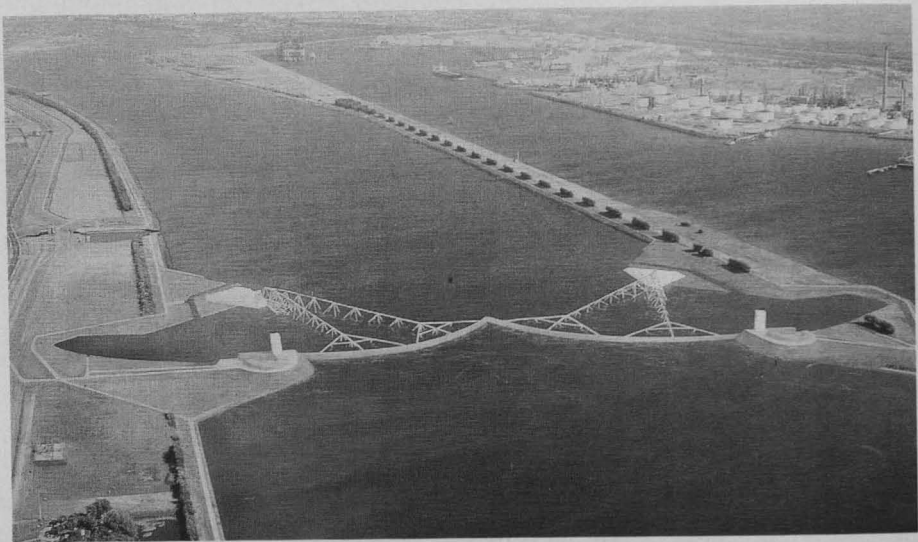


Abb. 7:  
Sperrwerk Rotterdam,  
Breite 400 m.  
Oben Photomontage,  
links Größenvergleich einer  
Sperrwerktorhälfte mit dem  
Eiffelturm

## 2 Das Bauwerk: ein Unikat

Bauingenieure bauen im Gegensatz zu fast allen anderen Ingenieurdisziplinen Unikate, oft sehr große Unikate. Wegen der großen Massen in jedem Bauwerk ist ihnen im allgemeinen im Voraus ein Testen ihrer Bauwerke oder auch nur wichtiger Teile von ihnen verwehrt: Sie können keine Probe-Brücke zum Studium ihres Verhaltens bauen, verbessern und dann das endgültige Exemplar herstellen. Nur selten können sie mit einem Modell, z. B. mit einem verkleinerten Ausschnitt aus ihrem Bauwerk, ins Labor gehen. Und wenn sie es tun, stehen sie vor dem Problem, die an der Kleinprobe gewonnenen Erkenntnisse auf das Bauwerk zu übertragen.

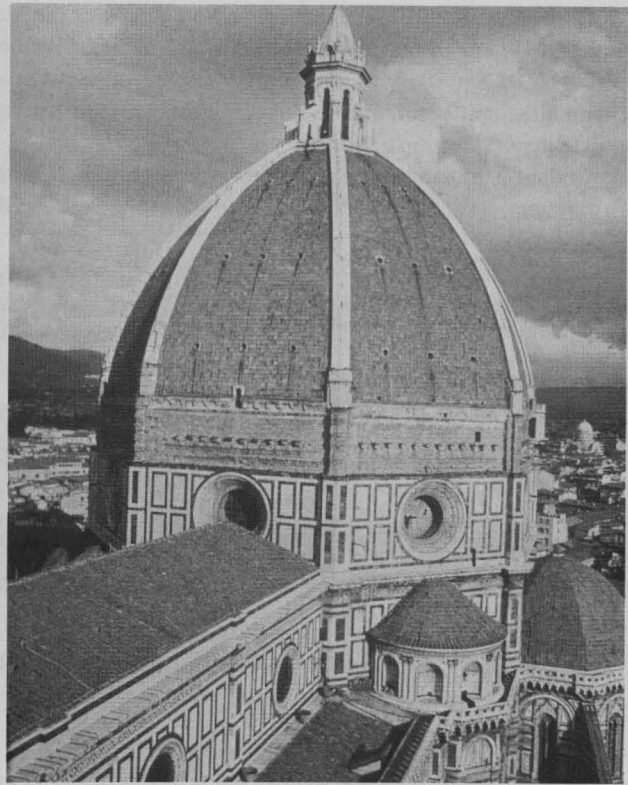


Abb. 8:  
Domkuppel Florenz,  
Durchmesser 42 m

### *Hauptabmessungen*

Länge des aufgehängten Brückenträgers	3 660 m
Mittelspannweite	3 300 m
Bezogener Stich	1 : 11

### *Kabel*

Insgesamt	2 x 2 = 4
Länge	5 300 m
Achsabstand der Paare	52 m
Durchmesser	1,24 m
je Kabel	88 Seile
je Seil	504 Drähte
Drahtdurchmesser	5,38 mm
Gewicht je Kabel	1,00 t/m
Gesamtgewicht	166 000 t

### *Pylone*

Höhe	376 m
Querriegel	4 Stück
Stiele	rhombenförmig, 16 m x 12 m
Gewicht	108 200 t

### *Brückenträger*

Gewicht mit	
Ausrüstung	23,3 t/m
Gewicht	70 500 t

Abb. 9: Vorentwurf für Hängebrücke über die Straße von Messina. Wichtige Bauwerksdaten



Gegenüber ihren Vorgängern haben Bauingenieure die Möglichkeit zum Experimentieren an Teilen des geplanten Tragwerkes weitgehend verloren. Fehlen von Mitteln und Zeit werden dafür oft als Gründe vorgeschoben. Bauaufsichtlich völlig überflüssige Hemmnisse mit zeitraubenden und im Ergebnis unsicheren Entscheidungsprozessen sind leider oft eher ein Grund.

Und die Simulation im Rechner ist zwar oft hilfreich, aber nur z. T. ein Ersatz für das Experiment, da sie ja nur das in der Modellierung vorausgedachte Verhalten wiedergeben kann.

Was wir verloren haben, wird uns z. B. bewußt, wenn wir uns daran erinnern, was Robert Stephenson in Versuchen (Abb. 10) [7] getestet hat wie z. B. eine Versuchsröhre im

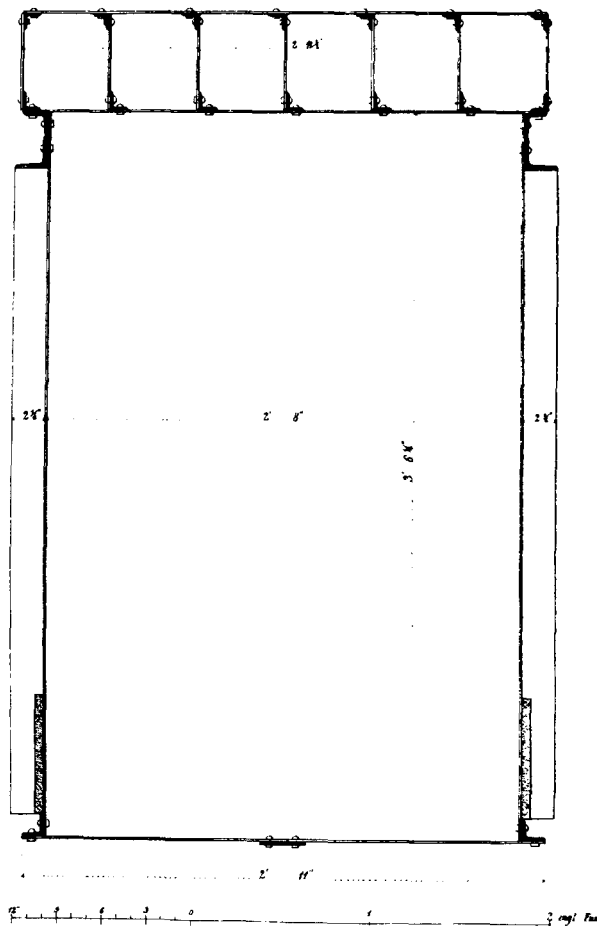


Abb. 10:

Versuchsröhren von Robert Stephenson für den Bau der Britannia-Brücke im Jahr 1851:  
Länge 23 m, Höhe 1,4 m, Breite 0,8 m

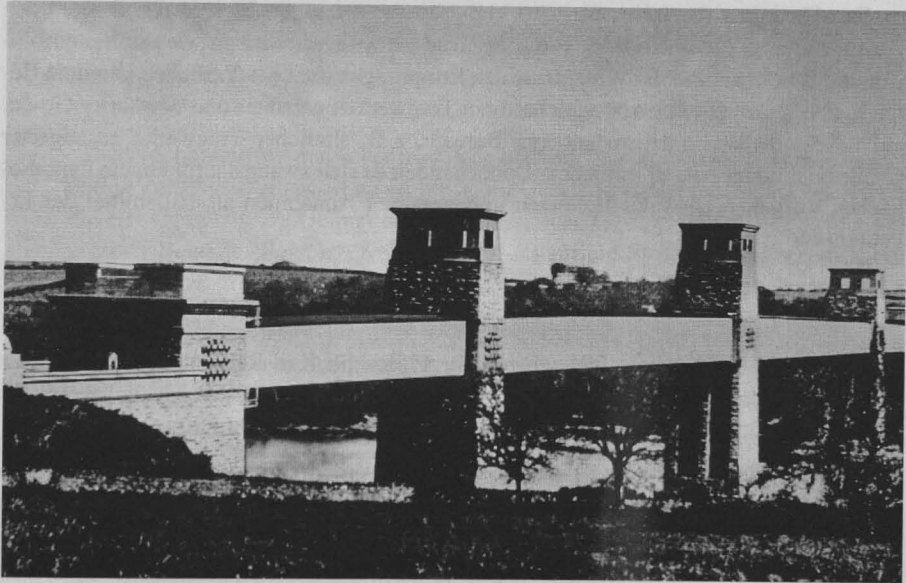


Abb. 11

*Britannia-Brücke von Robert Stephenson, größte Spannweiten 144 m*

Maßstab 1 : 6, d. h. mit rd. 23 m Länge, 1,4 m Höhe und 0,8 m Breite, und was er sich an Möglichkeiten für den Bau (Abb. 11) offen hielt, bevor er 1850 wagte, die Britannia-Röhrenbrücke mit 144 m Stützweite über die Menai-Straits zu bauen: seine Balkenbrücke hätte, falls erforderlich, als Hängebrücke komplettiert werden können, die Pfeiler erlauben dafür den Ausbau zu Pylonen.

Testen und Verbessern der Konstruktion sind in anderen Bereichen des Ingenieurwesens selbstverständlich. Das ist schon lange so, und ich möchte das mit einer Feststellung von Oskar von Miller (1855–1934) über Elektromotore der Fa. Siemens, belegen [8]:

„Man überzeugt sich, ob sie“ – die Maschine – „sehr stark oder nur wenig „funkte“, und die Erwärmung wurde durch Auflegen der Hände kontrolliert. Es war dabei erstaunlich, daß die Ingenieure von Siemens immer noch ihre Hände auf die Wicklung legen konnten, wenn unsere Ingenieure“ – die der AEG – „sich die Hände schon richtig verbrannten“.

Auch die Produkte des Maschinenbaus verlangen heute natürlich grundsätzlich andere Methoden der Entwicklung als das Handauflegen um die Jahrhundertwende. Aber sie sind nach wie vor auch Testen und Verbessern. Umfang und Aufwand dafür werden uns immer wieder deutlich, z. B. dann, wenn wir vom Zeitbedarf und von den Kosten der Entwicklung eines neuen Fahrzeug- oder Flugzeugtypes hören.

Das Vorgehen der Ingenieure des Maschinenbaus und der Elektrotechnik steht den Bauingenieuren nicht zur Verfügung! Sie sind gezwungen, ähnlich wie die Meteorologen, die Börsianer und die Winzer aus den Erfahrungen über das Verhalten in einem Bereich, z. B. einer Gruppe von gleichartigen Tragwerken gebauter und bewährter Größe, auf das Verhalten in einem anderen Bereich, z. B. ähnlicher Tragwerke gesteigerter Größe oder neuer Art, zu schließen. Dabei handelt es sich zwangsläufig um ein hypothetisches Vorgehen, also das Benutzen unbewiesener Annahmen als Hilfsmittel der Erkenntnis.

### 3 Extrapolieren = Hypothetische Vorgehen

Der am 17. September 1994 verstorbene Philosoph Karl R. Popper weist in seiner „Logik der Forschung“ [9] am Beispiel der Ansätze über Sterblichkeitswahrscheinlichkeiten nachdrücklich auf das Hypothetische beim Extrapolieren hin. Er schreibt:

„Empirisch ermittelte Todesfallstatistiken werden extrapoliert: man macht den Ansatz auf Grund der Hypothese, daß sich in der Vergangenheit empirisch ausgezählte Häufigkeitsverhältnisse zumindest auch in der nächsten Zukunft nicht stark ändern werden.

Induktionslogisch orientierte Theoretiker übersehen oft das hypothetische Element in diesen Ansätzen. Sie verwechseln

- die hypothetischen Ansätze, nämlich die Häufigkeitsprognosen auf Grund statistischer Extrapolation,
- mit einer ihrer Grundlagen – der empirischen Auszählung vergangener Ereignisfolgen.“

Popper stellt weiter heraus, daß damit keine logisch zu rechtfertigende Ableitung vorliegt, sondern immer die logisch durch nichts gerechtfertigte Hypothese, daß wir Extrapolieren dürfen. Alles was wir tun, ist Entwurf und Vermutung. Kein Entwurf, keine Vermutung läßt sich endgültig beweisen. Die Möglichkeit des Irrtums einzukalkulieren, ist also Bedingung des Fortschritts.

Beim Studium der Arbeit von Werner Heisenberg „Die Bewertung der ‚modernen theoretischen Physik‘“ wird verständlich, wie zutreffend das Beispiel „Voraussage der Mond und Sonnenfinsternis“ für Extrapolation im Deutschen Wörterbuch von Wahrig ist. –

Nebenbei: Heisenberg hat seine Schrift 1940 verfaßt; er zielte mit ihr letztlich auf die Verteidigung der Relativitätstheorie von Einstein. Sie war damit gegen die Vertreter einer sogenannten „Deutsche Physik als Gegenstück zur jüdischen Physik“ gerichtet. Erst drei Jahre nach der Vorlage wurde Heisenbergs Manuskript 1943 publiziert.

Heisenberg sagt in seiner Veröffentlichung u. a.:

„Der Physiker bezeichnet ... eine durch Verallgemeinerung früherer Versuchsergebnisse gewonnene Vorausberechnung, d.h. eine Theorie, dann als richtig.

wenn sie ihm gestattet, den Ausgang künftiger Experimente richtig voraussagen; dann kann sie die Grundlage für technische Anwendungen bilden; er bezeichnet sie als falsch, wenn Experimente die Voraussagen dieser Theorie widerlegen.“

„Die Ergebnisse systematischer Versuche über ein physikalisches Phänomen werden in der Physik zunächst zu empirischen Gesetzen zusammengefaßt (Beispiel: die Hebelgesetze ...). Gelingt es, viele empirische Gesetze durch Einführung geeigneter Begriffe (Beispiel: Kraftmoment ...) auf ein System weniger, einfacher Grundgesetze zurückzuführen, so entsteht eine Theorie (Beispiel: Newtonsche Mechanik ...).

Die Theorie ist also nicht ein von der Erfahrung unabhängiges Gedankengebäude, sondern der Versuch, viele Erfahrungen durch einige einfache Grundgesetze zusammenzufassen.

Stellen wir ... die Frage:

Kann eine Theorie durch Erfahrung bewiesen werden?

Die Antwort muß hier zweifellos lauten: nein, ein solcher Beweis ist im strengen Sinne niemals möglich. Aus der Tatsache, daß bisher die Sonne jeden Morgen aufgegangen ist, kann unmöglich in Strenge geschlossen werden, daß die Sonne auch morgen aufgehen wird. ... Der Sicherheitsgrad der Aussagen in der Physik unterscheidet sich von vornherein grundsätzlich von dem eines mathematisch-analytischen Satzes. Eine Theorie als „richtig“ oder „falsch“ anerkennen, heißt in der Physik nicht, sie als „streng“ bewiesen erkennen, sondern bedeutet: man ist ebenso überzeugt, daß ein zukünftiges Experiment dieser Theorie entsprechend ausgehen werde, wie man überzeugt ist, daß morgen die Sonne aufgehen wird. Der Grund für diese letzten Endes subjektive Überzeugung ist niemals ein logischer Beweis, sondern die Erfahrung. Zum Beispiel hat sich die These „Die Sonne geht jeden Morgen auf“, bisher ausnahmslos bewährt.“

Zur Erläuterung der Tatsache, daß eine Theorie nicht durch Erfahrung bewiesen werden kann, möge hier auch eine Passage aus „Die präparierte Zeit“ [11] von A.M. Klaus Müller dienen:

„Das Gebäude einer Theorie rundet sich zu einer Einheit der in ihr installierten Strukturen. Diese Einheit erweckt zeitweilig den Anschein von Endgültigkeit. Gerade dieser Anschein ... erhebt eine Theorie in den Rang, vertrauenswürdig, „richtig“ zu sein, obgleich jeder kritische Forscher weiß, daß die Frage ihrer künftigen Anerkennung unter veränderten Bedingungen immer offen bleibt: Ein Resultat kann genügen, sie zu widerlegen, eine Million Resultate, die sie richtig prognostiziert, reichen nicht aus, um sie endgültig zu sichern.“

Mit diesen, hier mit Zitaten von Popper, Heisenberg und Müller bewußt gemachten Befunden müssen sich auch Bauingenieure abfinden, d. h.:

Nichts rechtfertigt grundsätzlich, allgemein und von vornherein die Annahme, daß ein Bauwerk sich so verhält, wie ein ähnliches, aber nicht gleiches. Und dennoch stehen Bauingenieure unter dem Zwang – oder meinen oft, unter dem Zwang zu stehen – dieses Bauwerk zu entwerfen. Wenn sie dabei einen Schluß von einem oder einer großen Anzahl von Bauwerken auf ein noch nicht gebautes ziehen, sind sie eben nicht im Bereich der Mathematik, die mit dem Schluß von  $n$  auf  $n + 1$  sicher ist.

Bauingenieure, in einem Teilgebiet der Physik tätig, sind dagegen, wenn sie bewußt vorgehen, nur überzeugt, daß es so ist. Und der Grund für diese letzten Endes subjektive Überzeugung ist – ich wiederhole aus dem Zitat von Heisenberg – ihre Erfahrung.

## 4 Zum Risiko beim Extrapolieren

### 4.1 Allgemein

Was kann Bauingenieuren beim Extrapolieren passieren, wo liegt ihr Risiko? Es liegt

- zum einen darin, daß ihre Modelle die Wirklichkeit immer nur angenähert beschreiben und sie somit Modellunsicherheit in Kauf nehmen müssen.  
Von dieser Unsicherheit wissen sie nur allgemein, oft aber dagegen nicht, ob und wie unsere Modelle in welchen Parameterbereichen noch hinreichend zutreffen oder sogar versagen.
- Zum anderen können ihre Modelle auch dann, wenn sie das Verhalten im Erfahrungsraum und darüber hinaus hinreichend genau abdecken und konsistent sind, außerhalb des Erfahrungsraumes versagen, weil sie unvollständig sind.

Vier bewußt einfach gewählte oder vereinfacht dargestellte Beispiele mögen zur Erläuterung dienen. Sie stammen aus dem Stahlbau.

### 4.2 Ein Beispiel aus dem Behälterbau

Kurt Klöppel, Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt, 1961 von der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft mit der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille ausgezeichnet, erläuterte seinen Studenten unser Problem am Beispiel oberirdischer zylindrischer Behälter für Flüssigkeiten und Gase (Abb. 12). Ihre Durchmesser sind von anfänglich bescheidenen Werten unter 10 m heute auf über 100 m gewachsen. Sie werden oft durch Festdächer abgedeckt, die durch Gespärre ausgesteift sind, wie man sie im Bauzustand in Abb. 12 erkennt.

Die Grenzzustände der Tragfähigkeit dieser Konstruktionen, die etwa die Form einer Kugelkalotte haben, waren zunächst bei kleinen Abmessungen Fließen des Werkstoffes und lokales Beulen. Die damit verbundenen Probleme beherrschten die Ingenieure beim Entwurf sicher. Sie wurden auf Tankdächer mit immer größeren Durchmessern und immer flacherer Ausführung extrapoliert. Überraschend stürzten plötzlich Tankdächer ein. Was war die Ursache, was haben uns die Unfälle gelehrt?



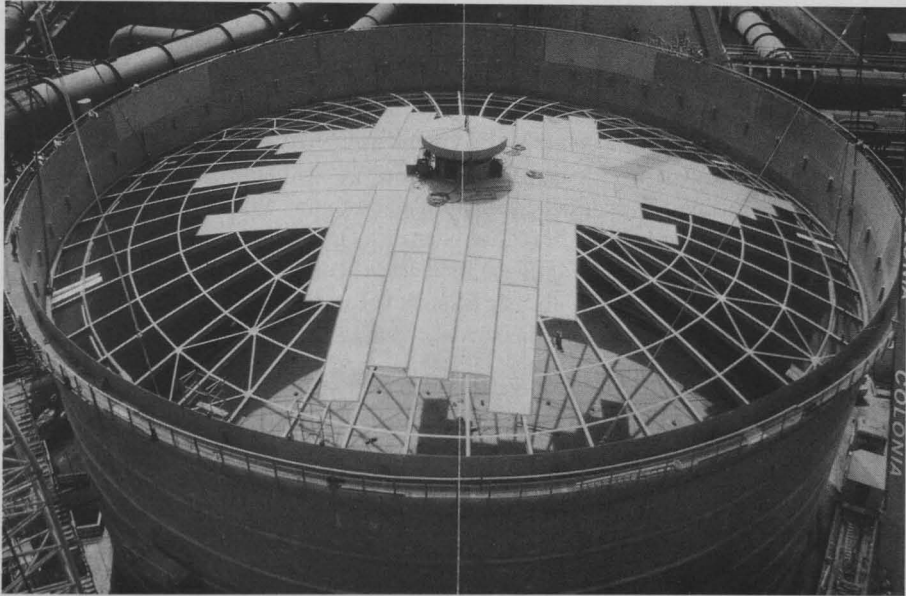


Abb. 12:

Tank mit Festdach im Bauzustand, Durchmesser 50 m

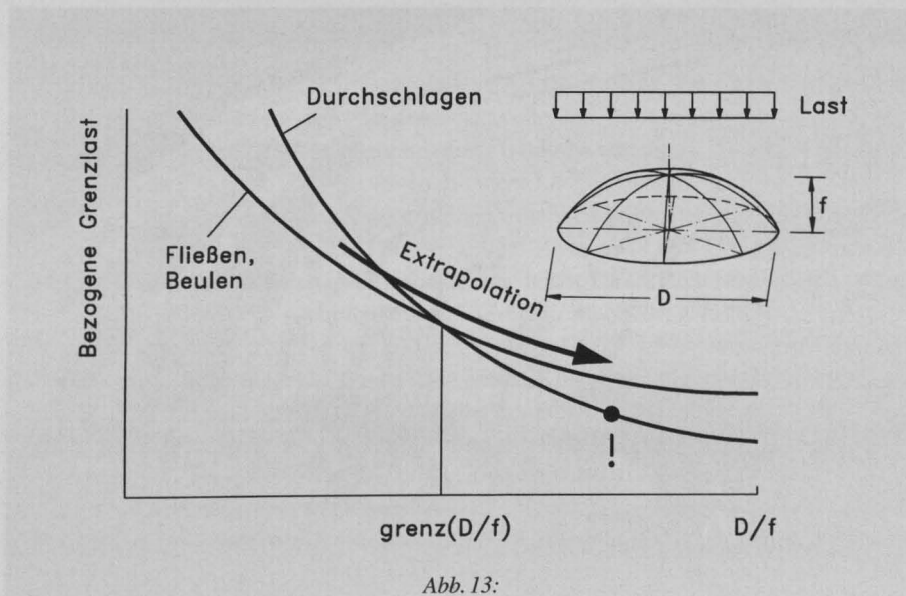


Abb. 13:

Fallunterscheidung Fließen/Beulen – Durchschlagen: Fehlerhaftes Extrapolieren

Das Problem des Durchschlagens – es handelt sich um ein spezielles Instabilwerden – war im Modell für die Beurteilung des Tragverhaltens dieser Dächer nicht enthalten. Es war auch für Dächer mit kleinem Durchmesser und relativ großem Stich ohne Bedeutung. Abb. 13 zeigt an diesem Beispiel grundsätzlich das Risiko, das beim Bauen mit dem Verlassen des Erfahrungsraumes, also beim Extrapolieren, gegeben ist:

Bei zunächst realisierten kleinen Verhältnissen von Durchmesser  $D$  zu Stich  $f$  wird die bezogene Grenzlasterlast durch Fließen und Beulen bestimmt. Wächst das Verhältnis  $D/f$  über *grenz* ( $D/f$ ) an, wird für die bezogene Grenzlasterlast Durchschlagen des ganzen Daches maßgebend. Unsere auf den Erfahrungen fundierte Theorie, mit der wir die Tankdächer beurteilten, ist zwar nicht falsch, aber sie ist nicht vollständig. Das wirkt sich erst im Bereich von  $(D/f) > \text{grenz}(D/f)$  aus und blieb daher zunächst unentdeckt.

Und was haben Bauingenieure hieraus gelernt oder sollten sie daraus lernen?

Wenn sie extrapolieren, kann das Suchen nach Vollständigkeit ihrer Modelle entscheidend sein. Es hilft ihnen, Defizite zu entdecken und nichts zu übersehen.

#### 4.3 Erstes Beispiel aus dem Tragerüstbau

Das Beispiel ist vom Grundsatz her ähnlicher Natur. Bei der Rettung der Ramses-Tempel von Abu Simbel in Nubien vor den Fluten des neuen Nil-Stausees (Abb. 14) in den 60er Jahren waren 60 m weit gespannte, freitragende Bogengerüste erforderlich

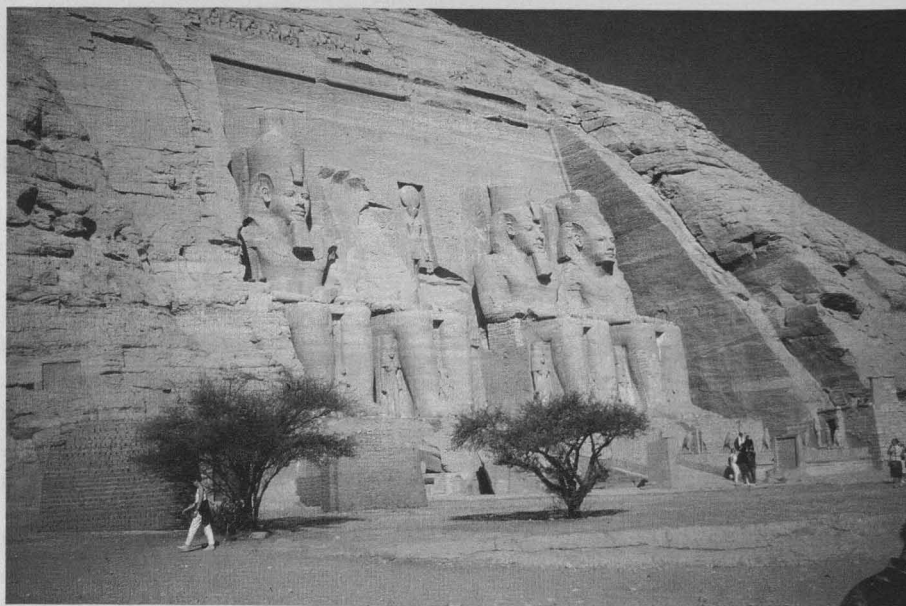


Abb. 14:  
*Ramses-Tempel Abu Simbel*



Abb. 15:  
Bogenlehrgerüst Abu Simbel, Stützweite 60 m

(Abb. 15), um über den Tempelkammern eine Betonschale zur Aufnahme der Lasten aus dem wiederangefüllten Erdreich herzustellen [12]. Wer heute nach Abu Simbel reist, kann den gewaltigen Raum unter der Schale und über den Tempelkammern betreten.

Zur Verfügung standen Rüstträger mit einer Bauhöhe von knapp 70 cm und maximalen Längen von 3 m (Abb. 16). Sie waren mit einer Längentoleranz von  $1\text{‰}$  gefertigt.

Bei der Montage des Gerüsts entstanden erhebliche Schwierigkeiten, da die nebeneinander liegenden Träger nicht ohne großen Zwang mit den Querträgern zusammengebracht werden konnten. Die Ursache war leicht zu erklären, aber alle Beteiligten beschäftigten sich erst nachträglich damit. Abb. 17 macht die Zusammenhänge deutlich:

Wenn man 2 Rüstträger der Länge  $l$  mit einem Knick zusammenbaut und dabei den planmäßigen Abstand *soll*  $L$  der beiden Endlager einhält, kommt ein größerer Stich *ist*  $f$  als der planmäßige Stich *soll*  $f$  zustande, wenn die Träger gegenüber der Solllänge *soll*  $l$  Überlängen *ist*  $l$  haben. Die Empfindlichkeit steigt stark überlinear mit Abnahme des planmäßigen Stiches *soll*  $f$  an.

Die Darstellung gibt für den Grenzfall der Überlänge mit  $1\text{‰}$  das Verhältnis von *ist*  $f$ /*soll*  $f$  in Abhängigkeit vom planmäßigen bezogenen Stich *soll*  $f$ /*soll*  $l$  als Maß der Krümmung des Bogens an.

Das Verhältnis *soll*  $f$ /*soll*  $l$  im Scheitel des Bogengerüsts in Abu Simbel lag bei etwa  $\frac{18}{300} = 0,06$ . Damit liest man im Abb. 17 *ist*  $f$ /*soll*  $f$  = 1,25 ab, d. h. der Verbindungspunkt

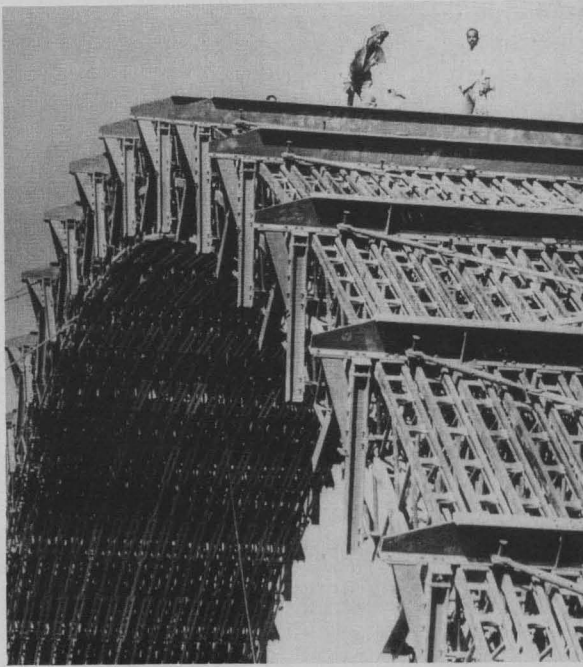


Abb. 16:  
Bau-Elemente und Querträger  
des Bogenlehrgerüsts  
Abu Simbel

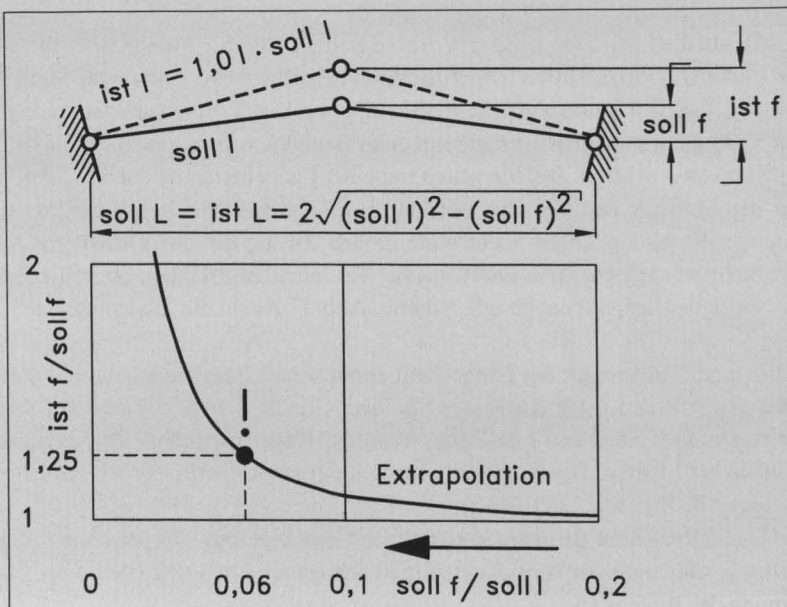


Abb. 17:  
Zum Einfluß der Längenabweichung auf die Bogenform

liegt  $0,25 \cdot 18 = 4,5$  cm zu hoch, wenn der Rüstträger  $1\text{‰}$  zu lang und entsprechend zu tief, wenn er  $1\text{‰}$  zu kurz ist.

Alle Beteiligten hatten – dies allerdings unbewußt – aus den Erfahrungen bei geraden Trägern extrapoliert und sich um die Längentoleranzen nicht gekümmert. Daß dies bei der Bogenform völlig anders war, hatten wir übersehen.

#### 4.4 Zweites Beispiel aus dem Tragerüstbau

1974 stürzte in Süddeutschland ein Gerüst beim Bau einer Straßenbrücke ein (Abb. 18), bei dem mehrere Bauarbeiter ihr Leben verloren. Für diese Betrachtung ist folgender Sachverhalt wichtig:

Die Brücke hatte ein relativ großes Quergefälle von rd. 4 %. Hätte man den Schalboden auf einem Gerüst mit im Lot angeordneten Rüstträgern (Abb. 19, links) aufgebracht, wären an jedem Kreuzungspunkt von Rüstträgern und Kanthölzern Keile erforderlich geworden, über 1000 Stück für die Brücke. Um diesen Aufwand zu vermeiden, entschloß man sich, ähnlich wie zuvor bei weniger weit gespannten Gerüsten mit Walzprofilen, die Rüstträger genau so wie den Schalboden zu neigen (Abb. 19, rechts). Damit entsteht aus dem Gewicht von Rüstträgern, Schalung, Bewehrung und Beton die Abtriebskomponente  $F_{Abr.} = G \cdot \sin \alpha$  (Abb. 19, rechts). Sie wurde von den Gerüstplanern nicht dem Wind- und Stabilisierungsverband zugewiesen. Es wurde vielmehr aus der Erfahrung mit anderen Gerüsten ohne Nachprüfung extrapoliert, daß sie durch Querbiegung im Rüstträger ohne für die Standsicherheit gewichtige Folgen aufgenommen werden kann.

Die Erfahrung betraf Gerüste mit kleineren Querneigungen und Walzträgern mit einem relativ kleinen Verhältnis der beiden Widerstandsmomente  $W_y/W_z = \text{rd. } 3$  (Abb. 20).



Abb. 18:

1974 eingestürztes Tragerüst für eine Straßenbrücke



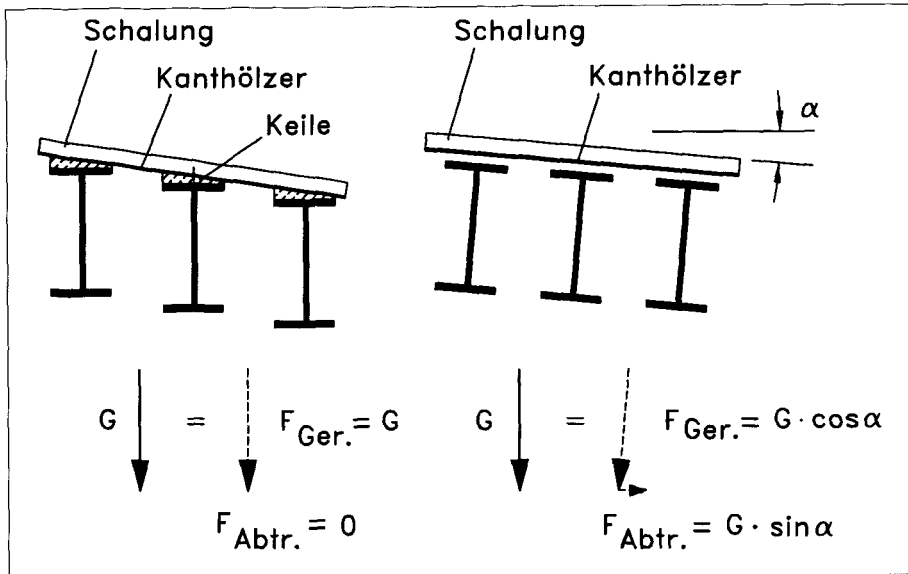


Abb. 19:

Traggerüst für quergeneigte Brücke: Lösungsmöglichkeiten

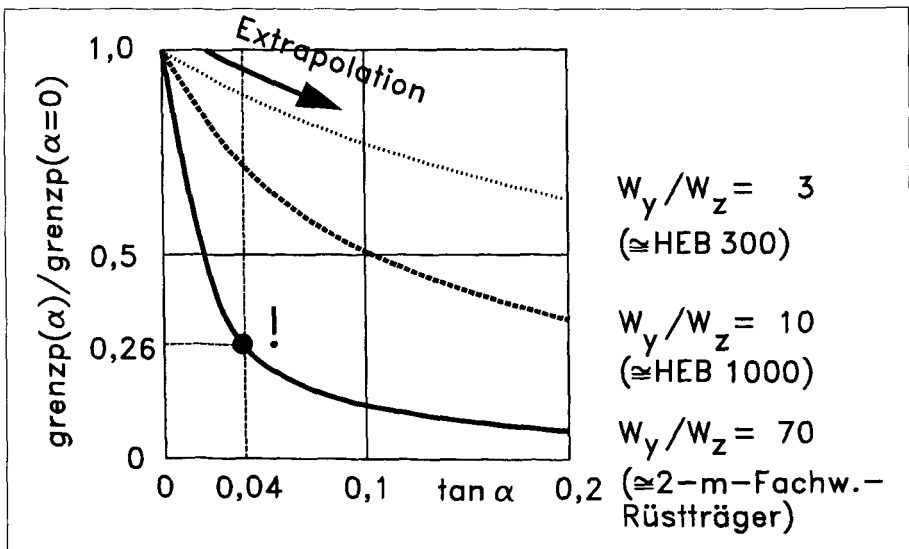


Abb. 20:

Falsches Extrapolieren als Ursache für Lehrgerüsteinsturz

Bei ihnen hat die Querbiegung nur einen kleinen Einfluß auf die Tragsicherheit. Aber hier war es aus zwei Gründen entschieden anders:

- die hochgezüchteten rd. 2 m hohen Fachwerk-Rüstträger haben mit  $W_y/W_z = \text{rd. } 70$  ein deutlich größeres Verhältnis der Widerstandsmomente, und
- die Querneigung von rd. 4 % war extrem groß.

Die Zusammenhänge macht Abb. 20 deutlich.

Was sollten Bauingenieure aus diesem Unglück lernen? Zunächst erneut, beim Extrapolieren umsichtig zu sein. Aber darüber hinaus verbindet sich mit ihm die dringende Mahnung zu besonderer Vorsicht beim Verwenden von Bauteilen, die in bezug auf die Traglast hochgezüchtet sind. Gerade die zunehmende planmäßige Optimierung kann zu Empfindlichkeiten, ja Gefahren dicht am Rande des mit Erfahrung belegten Parameter-raumes führen. Denn im allgemeinen zielt die Optimierung nur auf eine oder nur auf wenige Eigenschaften, alle kann sie in praktischen Fällen nicht erfassen.

#### 4.5 Beispiel aus dem Bau abgespannter Maste

Abgespannte Maste (Abb. 2) werden am Fuß gelenkig gelagert (Abb. 21), weil die großen Neigungen des Mastfußes sonst zu großen Zwängungen im unteren Bereich des Mastschaftes führen. Die Fußlagerung wird im allgemeinen auf klassische Weise realisiert (Abb. 22): das Lagerunterteil endet nach oben mit einer Kugelkalotte, auf die das Lageroberteil mit einer ausgedrehten Kalotte aufgesetzt wird. Der Radius  $R_o$  der oberen Kalotte ist etwas größer als der der unteren  $R_u$ , dadurch wird garantiert, daß sich das obere auf dem unteren Teil in jeder Richtung neigen kann.

Unsere Kenntnisse über die Hertzsche Pressung haben im Lauf der Entwicklungen zu immer kleineren Unterschieden zwischen den beiden Radien  $R_o$  und  $R_u$  geführt. Damit optimierte man die Lager über ihre Form hinsichtlich ihrer sonstigen Abmessungen und der Ansprüche an den Werkstoff.

Lange Zeit war nicht bedacht worden, daß mit dieser Optimierung folgender Nachteil verbunden ist: Je kleiner die Differenz der Radien ist, desto weiter wandert das Berührungszentrum aus der Lagerachse aus. Das kann wegen der damit verbundenen, relativ großen Exzentrizität der Lastübertragung sowohl für die Bauteile, die oberhalb und unterhalb der Berührungsfuge liegen, gefährlich werden, als auch unmittelbar für das Lagerunterteil, wenn das Berührungszentrum zu weit an dessen Rand wandert.

Die Neigung  $w'$  beträgt bei abgespannten Masten unter extremen Windlasten etwa 1 % bis 1,5 %. Für 1 % sind die Zusammenhänge im Abb. 23 dargestellt:

- um die Hertzsche Pressung zu reduzieren, wählt man Verhältnisse  $R_o/R_u$  gegen 1 und wird dabei reichlich belohnt. Die zeigt die ausgezogene Kurve mit der links angetragenen Skala für das Verhältnis der Hertzschen Pressungen für den Fall eines endlichen Radius  $R_o$  zu der für  $R_o = \infty$ .
- Was daraus aber mit deutlich überlinearem Einfluß folgt, zeigt uns die gestrichelte Kurve mit der rechts angetragenen Skala für das Verhältnis der Außermittigkeiten  $e$ , wieder für den Fall eines endlichen Radius  $R_o$  zu der für  $R_o = \infty$ .

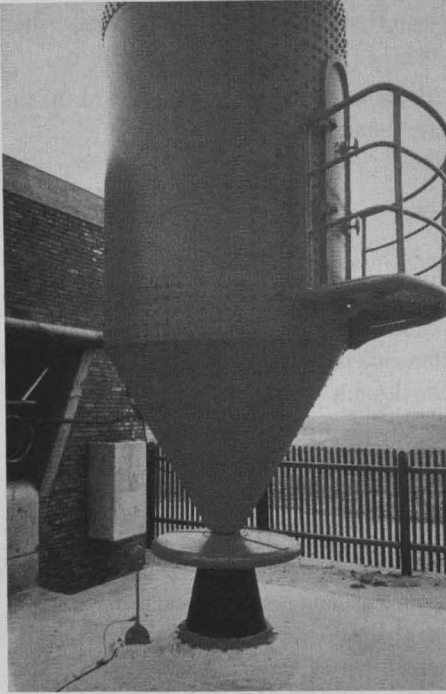


Abb. 21:  
Fußlager des Mastes Abbenrode.  
Höhe vor Umbau 240 m

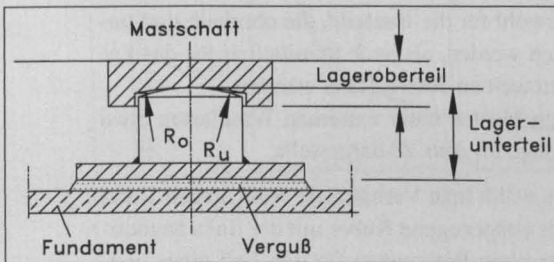


Abb. 22:  
Schnitt durch Fußlager abgespannter Maste

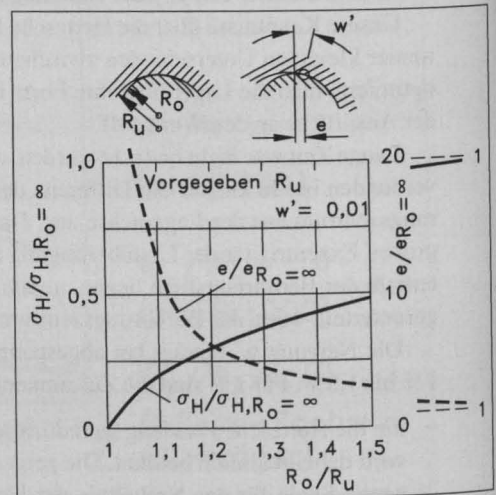


Abb. 23:  
Zunehmende Verschiebung des Lastzentrums  
als Folge der  
Verringerung der Hertzschen Pressung

An das große Auswandern des Berührungszentrums hatten alle Mastbauer noch vor etwa 10 Jahren nicht gedacht. Erst in der neuen Norm für Antennentragwerke aus Stahl aus dem Jahr 1991 [13] wird verlangt, es zu verfolgen. Damit wurde eine vermeintliche Optimierung dieser Lagerkonstruktion sinnvoll und vielleicht noch gerade rechtzeitig vor einem Schadensfall gebremst!

## 5 Allgemeinere Aspekte

Beim Extrapolieren in der Tätigkeit von Bauingenieuren geht es nicht nur um Fragen der Standsicherheit oder allgemeiner um die der Technik, sondern es kann auch um den Zweck unserer Bauwerke und die sie benutzenden Menschen gehen.

### 5.1 Zum Zweck

Natürlich freuen sich berufsbegeisterte Bauingenieure über große Aufgaben. Sie dürfen sich aber nicht an Spekulationen über den Zweck von Bauwerken beteiligen, um mit fragwürdigen Extrapolationen zu schönen Projekten zu kommen. Weder auf dem Elbseitenkanal noch auf dem Main-Donau-Kanal sind die vorhergesagten Jahrestonnen-Kilometer bis heute erreicht. Und genau so fraglich sind die mit zur Begründung der Rentabilität der Transrapidstrecke zwischen Berlin und Hamburg genannten 15 Mill. Passagiere pro Jahr.

Warnendes Beispiel in dieser Beziehung ist der 1988 fertiggestellte, mit 55 km längste und mit 6,5 Milliarden Dollar Baukosten teuerste Eisenbahntunnel der Welt zwischen den beiden japanischen Inseln Honshu und Hokkaido [14]. Er wurde von der Gesellschaft, die die japanischen Schnellzüge Shinkansen betreibt, wegen der erfolgreichen Konkurrenz durch den Luftverkehr und wegen der hohen Betriebskosten nicht angenommen. Überlegungen, den Tunnel zu schließen oder ihn als Öllager oder zur Pilzzucht zu benutzen, blieben – vermutlich mehr aus Prestige- als aus Rentabilitätsgründen – bisher ohne Folgen. So dient er dem Lokalverkehr.

### 5.2 Zur Zumutung an die Nutzer

In diesen Bereich gehört auch die in einer amerikanischen Veröffentlichung provokativ gestellte Frage „Wieviel Kilometer Spannweite läßt sich ein Mensch als Benutzer einer Brücke bei Wind und Wetter zumuten?“.

Auch diese Frage oder allgemeiner die Frage, ob wir das technisch Mögliche den Menschen auch zumuten sollen oder dürfen, oder richtiger, ob die Menschen es sich zumuten lassen, müssen wir hier stellen. Als Ingenieure können wir sie aber nicht beantworten.

## 6 Zusammenfassung

Die Ausgangsfrage lautete: Woher nehmen Bauingenieure immer wieder die Courage und die Sicherheit, etwas zu verantworten, was es bisher nicht gegeben hat? Wie können sie es wagen, aus dem Raum ihrer Erfahrungen heraus zu extrapolieren, sich dem Zwang der Gesellschaft zu beugen, für sie neue Aufgaben zu erfüllen? Und man kann ergänzen: Warum entziehen sie sich nicht dem Zwang, warum lassen sie sich oft sogar gern zwingen?

Ich habe versucht bewußt zu machen, daß Extrapolieren immer hypothetischer Natur und daher mit Risiko verbunden ist: Sicher können wir nicht sein, nur überzeugt, daß sich ein zukünftiges Bauwerk unserer Theorie entsprechend verhalten wird, so wie wir überzeugt sind, daß morgen die Sonne aufgehen wird.

Der Grund für diese Überzeugung ist die Erkenntnis, die A. M. Klaus Müller in „Die präparierte Zeit“ [15] so – ich zitiere verkürzt – formuliert hat:

„Obgleich auf partikuläre Weise aus kleinen Ausschnitten der Natur ... heraus in unzähligen endlichen, nacheinander ausgeführten theoretischen und experimentellen Schritten langsam durch die Jahrtausende erschlossen, fügt sich dieses Wissen doch unaufhaltsam zu einem immer dichterem Netzwerk widerspruchsfreier Beziehungen zusammen ... Infolge der eindeutigen Kommunizierbarkeit geht nichts verloren, infolge der Reproduzierbarkeit bleibt aktuell in Geltung, was ... wahr gewesen ist. Und diese Wahrheiten stehen für Prognosen zur Verfügung.“

Um unserer Verantwortung beim Extrapolieren gerecht zu werden und nicht den Bauunfall als Lehrmeister zu riskieren, müssen wir uns der Gefahren bewußt sein.

Sie sind vorwiegend verborgen im Mangel an Vollständigkeit unserer Modelle: Duddes Frage [15] „Wie konsistent sind unsere Entwurfsmodelle?“ können wir beantworten, dagegen die nach der Vollständigkeit aber immer nur wieder stellen und über sie in jedem Einzelfall nachdenken.

Die Gefahren stecken auch im Erfolg von Entwicklungen in kleinen Schritten. Dieser hindert, innezuhalten und über Grundsätzliches nachzudenken. „Erfolgreiche Ingenieurkonstruktionen – ein Freibrief für nachfolgende?“ fragt W. Plagemann daher zu Recht in einem Kurzbericht [16] mit einer Diskussion über den Einsturz der Dee-Brücke 1847 in England.

Die Gefahren lauern auch in der Aufgabenverteilung der modernen arbeitsteiligen Welt. Sie lassen – ich zitiere F. Achleitner in Wolfdietrich Ziesel „Ingenieur – Bau – Kunst“ [17] – „das gesamtheitliche Denken immer mehr zur dilettantischen Groteske verkommen. Jede noch so unbedeutende Arbeit wird von einer Unzahl von Fachleuten in kleine Entscheidungsschritte aufgedröselte“. Daher ist die von Jörg Schlaich initiierte Arbeit der Stuttgarter DFG Forschergruppe „Ingenieurbauten – Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung“ so wichtig, trotz oder gerade wegen aller Schwierigkeiten, zu Ergebnissen zu kommen.

Die Gefahren steigen mit dem – wie eine Mode grassierendem – Vorgehen, Ergebnisse von Untersuchungen über automatisierte und daher von jedermann auszuführende



Regressionsrechnungen in einfache, oft linear formulierte, scheinbar doch recht allgemein gültige Gesetze zu pressen, ohne den Parameterraum für die Gültigkeit der Näherung zu klären.

Und sie wachsen auch mit der kritiklosen und scheinbar bequemen Verwendung des Computers, der uns verführt, Lösungen zu akzeptieren, ohne nach ihren Begründungen zu fragen.

Und Gefahren gehen auch auf die Tatsache zurück, daß Ingenieure immer weniger eine klare Sprache pflegen, oft zu wenig oder sogar keinen Wert auf eindeutige Festlegungen und Verwendung von Begriffen legen. Auch dadurch können Regeln mißverstanden werden und Konstruktionen versagen.

Vorsicht beim Extrapolieren muß aber angemessen bleiben, oder mit den Worten von Georg Christoph Lichtenberg:

„Zweifel muß nichts weiter sein als Wachsamkeit, sonst kann er gefährlich werden.“

Interpolieren können viele, verantworten zu extrapolieren aber können nur erfahrene und umsichtige Ingenieure mit gründlichem und umfassendem Fachwissen.

## Literatur

- [1] R. Müller, S. Polónyi, R. Wörzberger, F.-J. Ameling, U. Marhenke: Die Europahalle der Deutsche Messe AG in Hannover. *Bauingenieur* 70 (1995), 95–104
- [2] Scheer, J.: Design of space structures. Proceedings of the 1st National Conference on steel structures. Athen Juni 1991
- [3] Bergermann, R., Sobek, W.: Die Überdachung der antiken Arena in Nimes. *Bauingenieur* 67 (1992) 213–220
- [4] Grote, A.: Florenz. München: Prestel 1972
- [5] Scheer, J.: Gewaltiger Sprung auf Spannweite 3300 m beim Vorentwurf für die Hängebrücke über die Straße von Messina. *Bauingenieur* 70 (1995), 71–72
- [6] Fischer, M.: Stahlbrücken. In: *Stahlbau-Handbuch*, Teil 2. Köln: Stahlbau-Verlag 1985, dort Seite 569
- [7] Werner, E.: Die Britannia- und Conwaybrücke. Düsseldorf: Werner-Verlag 1969
- [8] Buchheim, G., Sonnemann, R. (Hrsg.): *Geschichte der Technikwissenschaften*. Leipzig: Edition Leipzig 1990, dort S. 304
- [9] Popper, K. R.: *Logik der Forschung*. 6. Aufl. Tübingen: J. C. B. Mohr 1976
- [10] Heisenberg, W.: Die Bewertung der „modernen theoretischen Physik“. *Zeitschr. f. d. ges. Naturwissenschaft* 1943, 201–212
- [11] Müller, A. M. K.: *Die präparierte Zeit*. Stuttgart: Radius 1972
- [12] Scheer, J.: Weitgespannte Bogenlehrgerüste für die Tempel in Abu Simbel – Statik, Montage und Messungen auf der Baustelle. *Bauingenieur* 44 (1969) 128–132
- [13] DIN 4131 „Antennentragwerke aus Stahl“. November 1991
- [14] Hawkes, N.: *Wunderwerke – Die großen Konstruktionen*. Augsburg: Weltbild-Verlag 1994
- [15] Duddeck, H.: Wie konsistent sind unsere Entwurfsmodelle? *Bauingenieur* 64 (1989) 1–8
- [16] Plagemann, W.: Erfolgreiche Ingenieurkonstruktionen – ein Freibrief für nachfolgende? *Bauingenieur* 69 (1994) 421–422
- [17] Achleitner, F.: *Architektur und Schwerkraft*. In: Ziesel, W.: *Baukunst – Ingenieur*. Wien: Wiener Akademiereihe Band 26, 1989

**Bildquellen**

- 1 Europahalle Hannover-Messe. Hannover: Verlag Artforum 1993
  - 4 Anton Ruthmann, Genscher-Hochmoor
  - 5 MERO-Raumstruktur, Würzburg
  - 6 Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart
  - 7 Niederl. Ministerium für Verkehr, Wasserwirtschaft und öffentliche Arbeiten
  - 8 P. Merisio: Toskana. Zürich: Atlantis Verlag 1987
  - 10, 11 Werner, E.: Die Britannia- und Conwaybrücke. Düsseldorf: Werner-Verlag 1969
  - 12 F. A. Neumann, Eschweiler
  - 16 Hünnebeck GmbH, Ratingen
- Alle anderen: Verfasser